

第25卷 第23期
2005年12月

中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE

Vol.25 No.23 Dec. 2005
©2005 Chin.Soc.for Elec.Eng.

文章编号: 0258-8013 (2005) 23-0042-05 中图分类号: TM71 文献标识码: A 学科分类号: 470-40

一类切换线性中立时滞系统稳定性的分析

孙希明¹, 付俊¹, 孙洪飞², 赵军¹

(1. 东北大学教育部流程工业综合自动化实验室, 辽宁省 沈阳市 121004;
2. 厦门大学自动化系, 福建省 厦门市 361005)

STABILITY OF LINEAR SWITCHED NEUTRAL DELAY SYSTEMS

SUN Xi-ming¹, Fu Jun¹, SUN Hong-fei², ZHAO Jun¹

(1. Key Laboratory of Process Industry Automation; Ministry of Education,
Northeastern University; Shenyang, 110004, Liaoning Province, China;
2. Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China)

ABSTRACT: The concept for switched neutral delay system is introduced for the first time in this paper. The asymptotical stability problems for switched linear neutral delay systems are considered. By using single-Lyapunov technique and multiple-Lyapunov function technique, some sufficient conditions of asymptotical stability and the corresponding switching laws are given in the form of linear matrix inequalities (LMIs). Under the assumption that there exist finite candidate controllers with known gain matrices but none of them can stabilize the neutral delay system, the hybrid state-feedback control laws are designed such that the closed-loop system is asymptotically stable. The simulation example about partial element equivalent circuits (PEEC) demonstrates the effectiveness of the design method.

KEY WORDS: Switched system; Neutral delay system; Stability; Hybrid state-feedback controller

摘要: 提出了切换中立时滞系统的概念。研究了线性切换中立时滞系统渐近稳定性问题, 并分别利用单 Lyapunov 函数法和多 Lyapunov 函数法, 以线性矩阵不等式的形式分别给出一类切换线性中立时滞系统渐近稳定的充分条件及切换律的设计。然后假设存在有限个备选的控制增益已知的控制器, 并在任何单一的状态反馈控制器都不能镇定系统时, 设计该类系统的混杂状态反馈控制器, 使闭环系统渐近稳定。最后用部分元件等效电路(PEEC)的仿真例子验证了结论的有效性。

关键词: 切换系统; 中立时滞系统; 稳定; 混杂状态反馈控制器

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60274009; 60574013); 辽宁省自然科学基金项目 (20032020); 福建省自然科学基金项目 (A0510002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60274009; 60574013).

1 引言

许多工程系统可由中立型微分方程建模, 如包含气液体管道的热量转化过程^[1], 无损电线传输, 全波等效电路^[2]等, 文献[3]中给出了一个四维的线性中立时滞系统, 用以描述无损电线传输中电压和电源的波动。另外, 中立时滞系统经常出现在自动化控制、人口动态等问题的研究中^[4]。因此, 近来中立时滞系统受到广泛关注^[1-6]。目前对中立时滞系统的研究多集中在稳定性分析上, 以寻找系统渐近稳定的时滞依赖或时滞独立型的条件。

切换系统是混杂动态系统中的一种重要类型^[7-12]。如果切换系统中每个子系统都是中立时滞系统, 则这种切换系统称为切换中立时滞系统。目前, 对于切换中立时滞系统的研究尚未见报道。切换中立时滞系统的概念为: 现实中存在众多中立时滞系统的模型, 同一种模型中的几个子系统按照某个切换规则组成的系统就是切换中立时滞系统的实际模型。比如, 几根传输线按某个规则切换, 当考虑电压和电源的波动关系时, 即是切换中立时滞系统的一个模型。由于本来不稳定的子系统经切换后, 切换系统可能是稳定的, 反之, 稳定的子系统经切换后, 切换系统也可能不稳定。而稳定性是一切实际系统运行的基本要求, 因此对切换中立时滞系统稳定性的研究具有重要意义。

本文分别利用单 Lyapunov 法和多 Lyapunov 法研究切换中立时滞系统的稳定性问题。与以往利用单 Lyapunov 法在 n 维状态空间 R^n 进行线性切换域

的划分不同,本文利用当前状态及滞后状态的信息,在 R^{3n} 空间中划分切换域,给出使切换中立时滞系统渐近稳定的充分条件,同时给出切换律的设计方案。随后,假设系统存在有限个备选的、控制增益已知的控制器,并且任何单一的状态反馈控制器都不能镇定系统时,基于 LMI 的形式给出使闭环系统渐近稳定的混杂状态反馈控制器存在的充分条件。PEEC 的仿真结果显示了所提出方案的有效性。

2 系统的描述与问题的提出

考虑一类特殊的切换线性中立时滞系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_s x(t) + A_h x(t-h) + A_d \dot{x}(t-d) \\ x_{t_0}(q) = x(t_0+q) = j(q) \quad q \in [-t, 0] \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x(t) \in R^n$ 为状态; $A_s \in R^{n \times n}$, A_h, A_d 为常数矩阵; $s: [0, \infty) \rightarrow M = \{1, 2, \dots, m\}$, 是一个依赖于时间 t 或状态 x 的分段常值函数; $j(q)$ 为连续的向量值初始函数; $h > 0, d > 0$ 为时滞常数; $t = \max\{h, d\}$ 。

具有控制输入的线性中立型时滞系统为

$$\dot{x} = Ax + A_h x(t-h) + A_d \dot{x}(t-d) + Bu \quad (2)$$

式(2)有着广泛的应用背景^[6]。在以下 3 种情况下,式(2)可转化为式(1):

(1) 某个时间段上某些执行器可能会失效。执行器失效情况可采用可靠控制研究中常用的处理方法^[13]。

(2) 由传感器向接受器传递信号时,由于丢包和延迟的原因^[12]。

(3) 当系统有若干个被选的控制器的^[14-15]。

当遇到以上 3 种情况时,可将系统式(2)的稳定化问题的研究转变为对系统式(1)的稳定性的研究。

本文所要解决的问题是:设计切换律 $s: [0, \infty) \rightarrow M$, 使切换线性中立时滞系统式(1)是渐近稳定的,进而研究如何设计混杂状态反馈控制器,使一般线性中立时滞系统式(2)渐近稳定。

3 切换中立时滞系统的渐近稳定性

3.1 单 Lyapunov 函数法

下面用单 Lyapunov 函数法设计切换系统(1)的渐近稳定切换律。

令 $g_{a_1, a_2, \dots, a_m}(A_1, A_2, \dots, A_m) = \{a_1 A_1 + a_2 A_2 + \dots + a_m A_m : a_1, \dots, a_m \in [0, 1], a_1 + \dots + a_m = 1\}$ (3)

定理 1: 若存在 $\bar{A} \in g_{a_1, a_2, \dots, a_m}(A_1, A_2, \dots, A_m)$, 及正定矩阵 $P > 0, Q > 0, S > 0$, 使如下线性矩阵不等式

成立:

$$\begin{pmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P + S + Q & (Q + S + P\bar{A})A_d & PA_h \\ * & -W & 0 \\ * & * & -S \end{pmatrix} < 0 \quad (4)$$

式中 $*$ 表示矩阵中相应的子块部分的转置。

则对于任一时滞 $h > 0, d > 0$, 存在切换律 $s: [0, \infty) \rightarrow M$, 使系统 (1) 渐近稳定, 其中, $W = Q - A_d^T (S + Q) A_d$ 。

证明: 因为 $\bar{A} \in g_{a_1, \dots, a_m}(A_1, \dots, A_m)$, 所以存在 $a_1, \dots,$

$a_m \in [0, 1]$, 使得 $\sum_{i=1}^m a_i = 1$, 并且 $\bar{A} = \sum_{i=1}^m a_i A_i$ 。将

之代入式(4)得 $\sum_{i=1}^m a_i \Pi_i < 0$, 其中

$$\Pi_i = \begin{pmatrix} PA_i + A_i^T P + S + Q & (Q + S + PA_i)A_d & PA_h \\ * & -W & 0 \\ * & * & -S \end{pmatrix}。$$

设任意 $x, y, z \in R^n$, 且 $(x^T, y^T, z^T)^T \in R^{3n} \setminus \{0\}$,

则有 $(x^T, y^T, z^T)^T \sum_{i=1}^m a_i \Pi_i (x^T, y^T, z^T)^T < 0$, 令

$$\Omega_i = \{(x^T, y^T, z^T)^T \mid (x^T, y^T, z^T)^T \Pi_i (x^T, y^T, z^T)^T < 0\} \quad (5)$$

则 $\bigcup_{i=1}^m \Omega_i = R^{3n} \setminus \{0\}$ 。

构造集合

$$\tilde{\Omega}_1 = \Omega_1, \dots, \tilde{\Omega}_i = \Omega_i - \bigcup_{j=1}^{i-1} \tilde{\Omega}_j, \dots, \tilde{\Omega}_m = \Omega_m - \bigcup_{j=1}^{m-1} \tilde{\Omega}_j \quad (6)$$

则有 $\bigcup_{i=1}^m \tilde{\Omega}_i = R^{3n} \setminus \{0\}$, 且 $\tilde{\Omega}_i \cap \tilde{\Omega}_j = \emptyset, i \neq j$ 。

设差分算子 $\tilde{A}(j) = j(0) - A_d j(-d)$, 由已知条件知式(4)的左边为负定矩阵, 则处于主对角线的 $-W < 0$, 即 $-(Q - A_d^T (S + Q) A_d) < 0$, $A_d^T Q A_d - Q < 0$ 。因此算子 A 是稳定的。

考虑 Lyapunov-Krasovskii 泛函如下:

$$V(x_t, t) = \tilde{A}^T(x(t)) P \tilde{A}(x(t)) + \int_{-h}^0 x^T(t+q) \cdot$$

$$S x(t+q) dq + \int_{-d}^0 x^T(t+q) Q x(t+q) ds$$

易证, 存在 $c_1 > 0, c_2 > 0$, 使

$$c_1 \|\tilde{A}(j)\|^2 \leq V(j) \leq c_2 \sup_{-t \leq q \leq 0} \|j(q)\|^2$$

其中 $c_1 = I_{\max}(P)$, $c_2 = I_{\max}(P)(1 + \|A_d\|)^2 +$

$$t[I_{\max}(S) + I_{\max}(Q)]。$$

为方便证明, 记 $x_h = x(t-h), x_d = x(t-d)$, 构造切换律如下:

$$\sigma(t)=i, \text{ 当 } (\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T \in \tilde{\Omega}_i, i \in M \quad (7)$$

当 $(\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T \in \tilde{\Omega}_i$ 时, 被激活的子系统为

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + A_h x(t-h) + A_d \dot{x}(t-d) \quad (8)$$

则 $V(x_i, t)$ 沿系统(1)对时间 t 的导数为

$$\dot{V}(x_i, t) = 2\tilde{A}^T(x(t))P\tilde{A}(x(t)) + x^T(S+Q)x -$$

$$x_h^T S x_h - x_d^T Q x_d = (\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T \cdot$$

$$\Pi_i(\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T < 0$$

由单 Lyapunov 函数方法, 并结合中立时滞系统稳定性定理(见文献[6]中的第 7.1 节)知, 切换系统(1)是渐近稳定的。

注 1. 如果 LMI 条件(4)满足, 由定理 1 的证明, 可按下面的步骤来设计切换律:

- (1) 求解正定阵 P, Q, S , 并计算相应的 Π_i ;
- (2) 通过式(5)、(6)划分切换域;
- (3) 由式(7)给出切换律。

注 2: 定理 1 中凸组合的参数 a_1, \dots, a_m 不能由 LMI 直接求得, 一般通过迭代的方法可以获得适当的参数。另外, 若 $a_j = 1(j \in M)$, 则第 j 个中立时滞系统是渐近稳定的, 此时 $s(t) \equiv j$, 系统不进行切换, 定理 1 退化为文献[5]中的引理 1。

注 3: 差分算子的稳定性是指相应的差分方程的解是一致渐近稳定的。具体定义参见文献[6]。

注 4: 以往利用单 Lyapunov 法时, 是在 n 维状态空间 R^n 中进行切换域的划分。文献[10]研究带有时滞摄动的一类切换系统的稳定性也是采用此种方法。本文与上述方法不同之处在于: 切换域的划分是在 R^{3n} 空间中完成, 不仅利用了当前状态信息, 而且充分利用了滞后状态的信息。

3.2 多 Lyapunov 函数法

考虑如下切换线性中立时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_s x(t) + A_{hs} x(t-h) + A_d \dot{x}(t-d) \\ x_{t_0}(q) = x(t_0+q) = j(q) \quad q \in [-t, 0] \end{cases} \quad (9)$$

式中 $s: [0, \infty) \rightarrow M = \{1, 2, \dots, m\}$, 为待设计的切换律。

当 $s(t) = i$ 时, 记 $A_{hi} = A_{hi}$, A_{hi} 为已知的常数矩阵。下面利用多 Lyapunov 函数法给出切换系统(9)渐近稳定的充分条件。

定理 2: 若存在同时非负实数 b_i (或同时非正) 以及正定矩阵 $P_i > 0, Q > 0, S > 0$, 使如下线性矩阵不等式组同时成立, 则对于任一时滞 $h > 0, d > 0$, 存在切换律 $s: [0, \infty) \rightarrow M$ 使系统式(9)渐近稳定。

$$\begin{pmatrix} Z_i & (Q+S+P_i A_i) A_d & P_i A_{hi} \\ * & -W & 0 \\ * & * & -S \end{pmatrix} < 0 \quad (10)$$

式中 $Z_i = P_i A_i + A_i^T P_i + S + Q + b_i(P_i - P_{i+1})$,

$W_i = Q - A_d^T(S+Q)A_d$, $P_{m+1} = P_1$, $i = 1, \dots, m$,

证明: 当 b_i 同为非负实数时, 令

$$A_i = \begin{pmatrix} P_i A_i + A_i^T P_i + S + Q & (Q+S+P_i A_i) A_d & P_i A_{hi} \\ * & -W & 0 \\ * & * & -S \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_i = \text{diag}(P_i - P_{i+1}, 0, 0), i = 1, \dots, m.$$

则矩阵不等式(10)即为

$$A_i + b_i \Gamma_i < 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (11)$$

由 S-procedure 知, 当矩阵不等式(11)对 $i = 1, \dots, m$ 同时成立时, 则对于任意 $x, y, z \in R^n$ 且 $(x^T, y^T, z^T)^T \in R^{3n} \setminus \{0\}$ 可得当 $(x^T, y^T, z^T)^T G_i (x^T, y^T, z^T)^T \geq 0$ 时有

$$(x^T, y^T, z^T)^T A_i (x^T, y^T, z^T)^T < 0 \quad (12)$$

$$\text{令 } \Omega_i = \{x \mid x^T A_i x \geq 0, A_i = P_i - P_j, j \neq i, \forall j \in M\}$$

$$\text{则 } \bigcup_{i=1}^m \Omega_i = R^{3n} \setminus \{0\}.$$

构造集合

$$\bar{\Omega}_1 = \Omega_1, \dots, \bar{\Omega}_i = \Omega_i - \bigcup_{j=1}^{i-1} \bar{\Omega}_j \dots$$

$$\bar{\Omega}_m = \Omega_m - \bigcup_{j=1}^{m-1} \bar{\Omega}_j.$$

显然有 $\bigcup_{i=1}^m \bar{\Omega}_i = R^{3n} \setminus \{0\}$, 且 $\bar{\Omega}_i \cap \bar{\Omega}_j = \emptyset, i \neq j$ 。

设差分算子 $\tilde{A}(j) = j(0) - A_d j(-d)$, 由式(10)可得 $W_i = Q - A_d^T(S+Q)A_d > 0$, 易得 $A_d^T Q A_d - Q < 0$ 。因此算子 A 是稳定的。

考虑 Lyapunov-Krasovskii 泛函为

$$V_i(x_i, t) = \tilde{A}^T(x(t)) P_i \tilde{A}(x(t)) + \int_{-h}^0 x^T(t+q) S x(t+q) dq + \int_{-d}^0 x^T(t+q) Q x(t+q) ds$$

构造切换律

$$s(t) = i, \text{ 当 } \varphi(x(t)) \in \bar{\Omega}_i, i \in M \quad (13)$$

当 $\tilde{A}(x(t)) \in \bar{\Omega}_i$, 有 $\tilde{A}^T(x(t)) A_i \tilde{A}(x(t)) \geq 0, i \in M$, 则有 $(\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T \Gamma_i \tilde{A}(x(t)), x_d^T, x_h^T)^T \geq 0$, 所以

$$(\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T A_i \tilde{A}(\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T < 0 \quad (14)$$

$V_i(x_i, t)$ 沿系统式(9)对时间 t 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(x_i, t) &= 2\tilde{A}^T(x(t)) P_i \tilde{A}(x(t)) + \\ & x^T(S+Q)x - x_h^T S x_h - x_d^T Q x_d = \\ & (\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T A_i \tilde{A}(\tilde{A}(x(t))^T, x_d^T, x_h^T)^T \end{aligned}$$

由式(14)知, $\dot{V}_i(\mathbf{x}_t, t) < 0$, 另一方面, 由切换律的设计知, $V_{s(t_j)}(\mathbf{x}_{t_j}) = \lim_{t \rightarrow t_j^+} V_{s(t)}(\mathbf{x}_t)$ 。由多 Lyapunov 函数法, 并结合中立时滞系统稳定性定理知, 切换系统式(9)是渐近稳定的。当 b_i 同为非正实数时, 同理可证。

4 混杂状态反馈控制器的设计

有些实际问题是不允许任意设计控制器的, 只能使用事先指定的有限个控制器。如实际工程系统中的计算机磁盘驱动器^[16]、某些机器人控制系统^[17]及汽车转向系统等。有时, 虽然可以设计某个控制器, 但可能结构过于复杂, 难以实现。若通过混杂状态反馈控制则可很好地实现控制目标^[14-15]。

假定如下中立时滞系统有限个备选的控制器的,

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_h\mathbf{x}(t-h) + \mathbf{A}_d\dot{\mathbf{x}}(t-d) + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (15)$$

并且每个单一的控制器的均不能镇定系统, 并假定其备选控制器为

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{k}_i\mathbf{x} \quad i=1, 2, \dots, m,$$

式中 \mathbf{k}_i 为已知的常数矩阵。

本节要解决的问题是设计混杂状态反馈控制律 $\mathbf{u} = \mathbf{k}_{s_i}\mathbf{x}$, 使系统渐近稳定。其中 $s_i: [0, +\infty) \rightarrow M = \{1, 2, \dots, m\}$, 为待设计的切换律。

定理 3: 若存在 $\mathbf{K} \in g_{a_1, a_2, \dots, a_m}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_m)$ 及 $\mathbf{P} > 0$, $\mathbf{Q} > 0, \mathbf{S} > 0$, 使得如下的 LMI 成立,

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Z}_2 & (\mathbf{Q} + \mathbf{S} + \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{A}_d & \mathbf{P}\mathbf{A}_h \\ * & -\mathbf{W} & \mathbf{0} \\ * & * & -\mathbf{S} \end{pmatrix} < 0 \quad (16)$$

则系统存在混杂状态反馈控制律, 使系统(15)渐近稳定。其中

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{K}^T\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{K} + \mathbf{Q} + \mathbf{S}$$

证明: 令 $\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{k}_{s_i(t)} = \mathbf{A}_{s_i(t)}$, 则由定理 1 易得定理 3 的证明。

5 仿真例子

在 VLSI(大规模集成电路系统)中, PEEC(部分元件等效电路)中包含带有时滞的元件^[2,18]。PEEC 的稳定性对于 VLSI 起着至关重要的作用。有时若干个 PEEC 可能都是不稳定的, 但通过引进某种切换策略, 使这些 PEEC 相互协调工作后, 便可保证整个系统的稳定性, 从而提高 VLSI 的性能。

本文考虑有 2 个 PEEC 模型构成的切换系统, 各子系统分别表示一个 PEEC 模型^[2,18]。系统描述

如下:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i\mathbf{x} + \mathbf{A}_h\mathbf{x}(t-h) + \mathbf{A}_d\dot{\mathbf{x}}(t-d) \quad i=1, 2 \quad (17)$$

$$\text{式中} \quad \mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} -5 & -0.5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ -1 & -5.5 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{A}_h = \begin{pmatrix} -0.5 & 0 \\ 0 & -0.8 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_d = \begin{pmatrix} -0.1 & 0.5 \\ 0.1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$h=0.5; d=1。$$

对于系统式(17), 若取初始值 $\mathbf{x}(0) = (3 \quad -2)^T$, $\forall t \in [-1, 0]$, 易见 2 个子系统都不稳定。下面利用定理 1 设计切换律, 使该系统渐近稳定。若取 $a_1 = a_2 = 1/2$, 则得

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} -2.25 & -0.25 \\ -0.5 & -2.25 \end{pmatrix}$$

解 LMI(4), 得正定解

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1.1690 & -0.1903 \\ -0.1903 & 1.2482 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1.8644 & 0.0856 \\ -0.0856 & 1.5661 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1.5856 & -0.0952 \\ -0.0952 & 2.4069 \end{pmatrix}。$$

从而有

$$\Omega_i = \{(\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{x}(t))^T, \mathbf{x}_d^T, \mathbf{x}_h^T)^T \mid (\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{x}(t))^T, \mathbf{x}_d^T, \mathbf{x}_h^T)^T \cdot$$

$$\Pi_i (\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{x}(t))^T, \mathbf{x}_d^T, \mathbf{x}_h^T)^T < 0\}, i=1, 2。$$

其中 $\Pi_i =$

$$\begin{pmatrix} 4.9996 & -0.3063 & -0.3188 & 2.1124 & 0.5845 & 0.1522 \\ -0.3063 & -9.7572 & -0.1539 & -0.6765 & -0.0951 & -0.9986 \\ -0.5578 & -0.3929 & -1.5112 & -0.0778 & 0 & 0 \\ 2.1124 & 0.5185 & -0.0778 & -1.5444 & 0 & 0 \\ 0.5845 & -0.0951 & 0 & 0 & -1.8644 & -0.0856 \\ 0.1522 & 0.9986 & 0 & 0 & -0.0856 & -1.5661 \end{pmatrix}$$

$\Pi_2 =$

$$\begin{pmatrix} -8.2400 & 0.1671 & 0.1611 & -1.1975 & 0.5845 & 0.1522 \\ 0.1671 & 6.6597 & 0.4374 & 0.4709 & -0.0951 & -0.9986 \\ 0.3337 & 0.6101 & -1.5112 & -0.0778 & 0 & 0 \\ -1.1975 & -0.3922 & -0.0778 & -1.5444 & 0 & 0 \\ 0.5845 & -0.0951 & 0 & 0 & -1.8644 & -0.0856 \\ 0.1522 & 0.9986 & 0 & 0 & -0.0856 & -1.5661 \end{pmatrix}。$$

则有 $\ddot{\Omega}_1 = \Omega_1$, $\ddot{\Omega}_2 = \Omega_2 - \Omega_1$, $\bigcup_{i=1}^2 \ddot{\Omega}_i = \mathbf{R}^6 \setminus \{0\}$, 且

$$\ddot{\Omega}_1 \cap \ddot{\Omega}_2 = \mathbf{f}。$$

系统的状态响应如下图, 可看出切换 PEEC 系统(17)在所设计的切换律下是渐近稳定的。

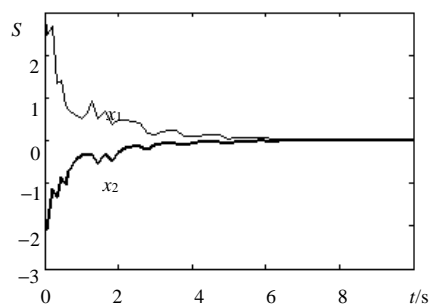


图1 切换系统式(17)的状态响应

Fig. 1 The state responses of switched system Formula(17)

6 结论

本文研究了一类切换线性中立时滞系统的稳定性问题。基于单 Lyapunov, 利用当前状态及滞后状态的信息, 在 R^{3n} 中划分切换域, 分别以 LMI 的形式给出切换线性中立时滞系统稳定性的充分条件及切换律的设计。同时文中还给出了基于多 Lyapunov 函数法切换线性系统渐近稳定的充分条件及切换律的设计。然后作为文中方法的一个应用, 又给出一般线性中立时滞系统通过控制器切换达到渐近稳定的充分条件。PEEC 的仿真结果验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] Kolmanovskii V B, Richard J P, Tchangan A Ph. Stability of linear systems with discrete-plus-distributed delays: Application to some model transformations[C]. Proceedings of MTNS, 1998, Padova, Italy.
- [2] Bellen A, Guglielmi N, Ruheli A E. Methods for linear systems of circuits delay differential equations of neutral type[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1999, 46(1): 212-216.
- [3] Salamon D. Control and observation of neutral systems[M]. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1984.
- [4] Park J. Robust guaranteed cost control for uncertain linear differential systems of neutral type[J]. Applied Mathematics and Computation, 2003, 140(2-3): 523-535.
- [5] Xu S Y, Lam J, Yang C W. H_∞ and positive-real control for linear neutral delay systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(8): 1321-1326.
- [6] Hale J K. Theory of Functional Differential Equations[M]. New York: Springer-Verlag, 1977.
- [7] Sun Z D, GE S S. Switched linear systems-control and design[M]. New York: Springer-Verlag, 2004.
- [8] 翟军勇, 费树岷. 基于在线学习的多模型自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 80-83.
- [9] 胡宗波, 张波, 邓卫华, 等. 基于切换线性系统理论的 DC-DC 变换器控制系统的能控性和能达性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 165-170.
- [10] 孙洪飞, 赵军, 高晓东. 带有时滞摄动的线性切换系统的稳定性[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 431-434.
- [11] Wang Y J, Xie G M, Wang L. Controllability of switched time-delay systems under constrained switching[J]. J. Math. Anal. Appl. 2003, 286: 397-421.
- [12] Lin H, Zhai G S, Antsaklis P. Robust stability and disturbance Attenuation analysis for a class of networked control systems[C]. Proc. of 42nd Conference on Decision and Control, Maui, HI, United States, 2003. 1182-1187.
- [13] Wang Z D, Huang B, Unbehauen H. Robust reliable control for a class of uncertain nonlinear state-delayed systems[J]. Automatica, 1999, 35: 955-963.
- [14] Nie H, Zhao J. Hybrid state feedback H_∞ robust control for a class of linear systems with norm-bound uncertainty[C]. Pro. of the A. C. C. Denver, Colorado, 2003.
- [15] 孙希明, 赵军. 一类不确定线性系统的混杂状态反馈保成本控制[J]. 控制与决策, 2005, 20 (4): 421-425.
- [16] Gollu A, Varaiya P P. Hybrid dynamical system[C]. Proc 28th IEEE conf. Decision and Control. FL USA: Tampa, 1989, 2708-2712.
- [17] Jeon D, Tomizuka M. Learning hybrid force and position control of robot manipulators[J]. IEEE Trans on Robotics Automat, 1996, 9: 423-421.
- [18] Qing-Long Han. On robust stability of neutral systems with time-varying discrete delay and norm-bounded uncertainty [J]. Automatica, 2004, 40: 1087-1092.

收稿日期: 2005-09-08。

作者简介:

孙希明 (1973-), 男, 博士生, 研究方向为切换时滞的稳定性;

付俊 (1979-), 男, 博士生, 研究方向为电力系统, 自适应控制;

孙洪飞 (1970-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为切换系统, 时滞系统;

赵军 (1957-), 教授, 博士生导师, 研究方向为切换系统, 非线性系统, 鲁棒控制等。